

University of Groningen

## Reverse electrodialysis design and optimization by modeling and experimentation

Veerman, Joost

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2010

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Veerman, J. (2010). *Reverse electrodialysis design and optimization by modeling and experimentation: design and optimization by modeling and experimentation*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

## Samenvatting

---

Er is een grote behoefte aan nieuwe energiebronnen die schoon en duurzaam zijn, geen thermische of chemische vervuiling geven en geen CO<sub>2</sub>-emissie veroorzaken. Een van de potentiële bronnen is zoutgradiënt energie (*salinity gradient power*, SGP), de energie die gegenereerd kan worden door reversibele menging van rivierwater met zeewater. De energiedichtheid van deze 'brandstof' is laag vergeleken met die van fossiele brandstoffen; desalniettemin zijn er grote beschikbare hoeveelheden van en het totale vermogen – het product van energiedichtheid en hoeveelheid – is aanzienlijk. Er zijn twee belangrijke uitdagingen: het vinden van goede locaties voor de toepassing van SGP en de ontwikkeling van een geschikte techniek om die SGP om te zetten in een bruikbare energievorm. Ons doel was dit laatste.

Toen we het project startten in 2005, dienden zich twee serieuze kandidaten aan in de literatuur: omgekeerde elektrolyse (*reverse electrodialysis*, RED) en drukvertraagde osmose (*pressure-retarded osmosis*, PRO). Toentertijd waren er slechts zes artikelen gepubliceerd die daadwerkelijke experimenten met RED beschreven; wat betreft PRO was er ongeveer dezelfde hoeveelheid literatuur. Van de twee kandidaat-technieken, leek RED experimenteel het meest aantrekkelijk omdat de conversie met deze techniek redelijk eenvoudig is, zonder dat er voorzieningen voor de hoge druk, drukwisselaars en turbines nodig zijn. Derhalve was de eerste onderzoeksvraag:

### **Is RED beter dan PRO voor de opwekking van energie uit zee- en rivierwater?**

In **Hoofdstuk 2** van dit proefschrift (*Comparison of different techniques for salinity gradient power*) tonen we aan dat de hoeveelheid winbare energie met RED en met PRO met gespecificeerde hoeveelheden diluaat en concentraat theoretisch hetzelfde is. Vanuit praktische overwegingen echter, gebaseerd op membraaneigenschappen zoals gepubliceerd in de literatuur, werd er geconcludeerd dat RED de aangewezen techniek is al er rivier- en zeewater gebruikt wordt en dat PRO aantrekkelijker is als er geconcentreerde zoutoplossingen gebruikt worden.

Toen we de eerste experimenten uitvoerden, realiseerden we ons dat er energieverlies was door drie kortsluitcircuits: de toevoerkanalen voor zeewater, de toevoerkanalen voor rivierwater en de elektrodespoeling. In principe kunnen parasitaire stromen voorkomen worden door gebruik te maken van mechanische afsluiters of door luchtbel injectie, maar het zou praktischer zijn een ontwerp te hebben met inherent lage verliezen. Daarom luidde de volgende onderzoeksvraag:

## Is het mogelijk het vermogensverlies door interne kortsluitstromen te beheersen door een adequaat ontwerp van de stack ?

Het bevestigende antwoord is beschreven in **Hoofdstuk 3** (*Reducing power losses caused by ionic shortcut currents in reverse electrodialysis stacks by a validated model*). We maakten een model van een RED-stack en valideerden dit model experimenteel met twee types RED-stacks met verschillende membranen en verschillende spacers. Het is mogelijk de interne kortsluitstromen te beschrijven met slechts drie parameters: (i) het aantal cellen  $N$ , (ii) de verhouding van de weerstand van het voedingkanaal en de celweerstand  $R/r$ , (iii) verhouding van laterale spacer weerstand en de celweerstand  $p/r$ . Met de gebruikte stack met 0.2 mm spacers en Fumasep membranen, was het verlies door interne kortsluitstromen 6% voor een stack met 50 cellen, wat aantoont dat deze kortsluitstromen beheersbaar zijn.

In de literatuur vonden we verschillende elektrodesystemen, daarom is de volgende vraag:

### Wat zijn bruikbare elektrodesystemen voor RED?

In **Hoofdstuk 4** (*Reverse electrodialysis: evaluation of suitable electrode*) wordt een inventarisatie gemaakt van alle aspecten van elektrodesystemen in termen van technische haalbaarheid, SHE (safety, health and environment, ofwel veiligheid, gezondheid en milieu) en kostprijs. Alle in de literatuur beschreven systemen werden geëvalueerd alsmede enige nieuwe systemen die door de auteur gebruikt zijn. De op ijzer gebaseerde systemen ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^3$  and  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ) met inerte metaalelektroden scoren het hoogst voor een economisch bedreven RED-centrale. Echter lijkt het gebruik van grafietelektroden ook een haalbare optie.

Uit experimenten zoals beschreven in Hoofdstuk 3 bleek dat systemen met dunne membranen en dunne spacers de beste prestaties leveren. Er werd een stack gebouwd met zulke spacers en membranen en met voldoende cellen om als prototype dienst te doen voor grotere stacks. Het doel was om een idee te krijgen van de geleverde vermogensdichtheid, de hydrodynamische verliezen in de stack en van de energie-efficiëntie van het systeem:

### Wat zijn de prestaties van een 10x10 cm<sup>2</sup> stack met 50 cellen?

In **Hoofdstuk 5** (*Reverse electrodialysis: performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water*) zijn de prestaties van deze stack beschreven. Het totale membraanoppervlak was  $1 \text{ m}^2$ . De verkregen vermogensdichtheid was  $0.93 \text{ W/m}^2$ , wat de hoogste waarde was ooit verkregen met een RED-stack; 25% van dit geproduceerde vermogen werd gebruikt door de drukval in de stack. De energie-efficiëntie (de conversie-efficiëntie van potentiële energie naar opgewekte elektriciteit) was 8%. Met een cascadeschakeling van 4 stacks werd een hogere energie-efficiëntie verkregen (18%), echter met een lagere vermogensdichtheid. ( $0.40 \text{ W/m}^2$ ).

Deze resultaten waren bemoedigend en de basis voor verder onderzoek. Het centrale thema is de beschrijving van vermogensdichtheid en de brandstofefficiëntie in termen van membraan- en spacereigenschappen, stack- en celafmetingen, vloeistofsnelheden enzovoorts. De prestaties van een stack worden beïnvloed door twee typen verliezen: hydrodynamisch en elektrische. De eerste zijn gelokaliseerd in de waterkanalen en in de spacers, de tweede in het watervoorzieningsstelsel (wegens de in Hoofdstuk 3 besproken lekstromen) en in de membranen. Membranen zijn van bijzonder belang omdat hier drie bronnen van verlies aanwezig zijn: osmose, co-ion transport en membraanweerstand. Daarom was de tijd aangebroken om dieper op de membranen in te gaan:

### **Wat is het effect van osmose, co-ion transport en membraanweerstand op het opgewekte vermogen en op de efficiëntie bij verschillende membranen?**

In **Hoofdstuk 6** (*Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density*) werden de experimentele resultaten beschreven. Het blijkt dat de bijdrage van co-ion transport en van interne vermogensdissipatie (wegens de elektrische weerstand) aan de totale verliezen vergelijkbaar zijn en dat het aandeel van osmose veel minder groot is. Het begrip response product (RP), het product van thermodynamische efficiëntie en van vermogensdichtheid, wordt geïntroduceerd als beoordelingsparameter. De hoogste RP-waarde werd bereikt met het Selemion membraan paar. Echter bleken de homogene membranen van Qianqiu ook vrij goed. Dat was goed nieuws omdat de prijs daarvan een factor 10 lager was dan van de andere membranen.

Er werd een nieuwe stack gebouwd met deze Qianqiu membranen. De afmetingen waren  $75 \times 25 \text{ cm}^2$  en de stack werd voorzien van 50 cellen (elke cel met twee membranen) en drie afzonderlijke elektrodeparen. Met een totaal actief membraanoppervlak van  $18.75 \text{ m}^2$  was het de grootste RED-stack die ooit gebouwd is. Met deze stack was het mogelijk de effecten te bestuderen van de verblijftijd, stroomrichting (mee- of tegenstroom), lengte van het

stroomtraject (75 cm bij horizontaal en 25 cm bij verticaal bedrijf) en van de segmentatie van de elektrode (ongedeeld of gescheiden in drie segmenten). De onderzoeksvraag was:

**Wat is het effect van de lengte van de stroomkanalen, verblijftijd, stroomrichting en van elektrode-segmentatie op de vermogensdichtheid en op de efficiëntie van een RED-stack?**

In **Hoofdstuk 7** (*The performance of a scaled-up reverse electrodialysis stack*) worden de resultaten van de betreffende experimenten besproken. Het bleek dat de verblijftijd een sleutelrol speelt bij de prestaties van de stack. Verder bleek het dat een lang stroomtraject hoge hydrodynamische verliezen veroorzaakt. Meestroom bleek in hogere vermogensdichtheden te resulteren en het effect van de elektroden is marginaal.

De experimenten zoals beschreven in Hoofdstuk 7 hebben veel data opgeleverd en zijn nuttig voor de validatie van een RED model. Daarom waren de volgende onderzoeksvragen:

**Hoe kan het RED proces gemodelleerd worden en hoe kan het ontwerp met dit model geoptimaliseerd worden?**

In **Hoofdstuk 8** (*Modeling the performance of a reverse electrodialysis stack*) wordt een model van het RED-proces ontwikkeld. Het model is gevalideerd en toegepast op verschillende stacks. Het model bevestigt de resultaten van experimenten zoals beschreven in Hoofdstuk 7. Het belangrijkste is dat lange stroomtrajecten onacceptabel hoge hydrodynamische verliezen veroorzaken. Met kortere trajecten kunnen er hogere vermogensdichtheden en acceptabele energie-efficiëntie verkregen worden, maar de totale hoeveelheid geproduceerd vermogen is laag in zulke cellen. De conclusie is dat de weg naar opschaling verloopt door de cellen juist kleiner te maken en door een fractaal ontwerp van deze cellen. Er is een patent ingediend voor een fractale oplossing: een integratie van spacers en membranen met een divergerend systeem van voedingskanalen. De vereiste structuren worden in het membraan geperst.

